

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-03

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

MODERNIZACION DE REGULADOR DE TURBINA CON CONTROL DE NIVEL EMPLEANDO HERRAMIENTAS DE SIMULACION EN TIEMPO REAL

G.F. VIGLIZZO* **IMPSA** **Argentina**

H. CENTINEO **IMPSA** **Argentina**

P. PERALTA **IMPSA** **Argentina**

Resumen *– El presente artículo describe la rehabilitación de un regulador de turbina, que además de las funciones de control de velocidad y potencia, efectúa el control de nivel de una cámara de carga combinando la acción del distribuidor con una válvula dispersora. El controlador electrónico y las válvulas mecánicas de pilotaje del antiguo regulador fueron reemplazados por modernos controles hidráulicos proporcionales y un controlador digital de última generación. El diseño del sistema regulador se apoyó en el uso de herramientas de simulación que permiten realizar pruebas sobre un modelo del conjunto turbina-válvula dispersora. El uso de estas herramientas permitió evaluar la respuesta dinámica del control implementado sobre diferentes escenarios de operación, los cuales fueron analizados y ensayados en fábrica antes de contar con el sistema real definitivo. Dicha metodología de trabajo permitió depurar el diseño y reducir el tiempo de puesta a punto del equipo en sitio, disminuyendo por tanto costos y eventuales riesgos.*
El modelado completo del sistema a controlar se llevó a cabo mediante un software de simulación de sistemas electrohidráulicos, y se implementó el controlador en un lazo HIL (Hardware-In-the-Loop) de tiempo real, destinado al desarrollo de la lógica de control del regulador (sobre la plataforma de un controlador comercial del tipo PLC) y la sintonización de los diferentes lazos de control. Se presentan los resultados de las simulaciones realizadas ante diferentes estados de operación, además de los obtenidos durante ensayos en sitio y la correspondiente validación de los entregados por el modelo desarrollado.

Palabras clave: Regulador de turbina – Control de nivel – Simulación – Modelo hidráulico – Tiempo real – Hardware-In-The-Loop – Validación

1 INTRODUCCIÓN

La central hidráulica Atucha II tiene la particularidad de que su embalse es una cámara de carga o pileta que se alimenta de agua del circuito de refrigeración de una central nuclear. La misma se reúne en un sistema de piletas colectoras que luego derivan sus caudales en una pileta mayor (denominada UQJ), donde se origina el conducto que alimenta de agua la turbina. La central hidroeléctrica consta de una turbina Francis, cuyo regulador original fue fabricado en los años 90.
La función del sistema de regulación es controlar conjuntamente el distribuidor de la turbina y una válvula dispersora de chorro hueco con el objetivo principal de mantener el nivel de la pileta UQJ en un valor constante, erogando para esto el caudal necesario. A su vez el regulador también controla la velocidad de la turbina y la potencia entregada al sistema cuando la misma se encuentra sincronizada con la red eléctrica. El

* Carril Rodríguez Peña 2451 Godoy Cruz C.P. 5503 - Mendoza - Argentina – gerardo.viglizzo@impsa.com

control de nivel debe ser estricto y bajo ninguna condición de operación el mismo debe superar los 24.8 m, ya que esto provoca una parada de las bombas de refrigeración de la central nuclear.
A continuación se describen brevemente los puntos más relevantes de la modernización, se detalla luego el modelado de la central hidráulica (conjuntamente con la descripción del lazo Hardware-In-The-Loop) en base al cual se realizan simulaciones, y finalmente se presenta la validación del modelo utilizado.

2 MODERNIZACION DEL SISTEMA DE REGULACION

El sistema de regulación original constaba de un controlador de tecnología obsoleta, cuya programación era compleja y sus módulos digitales/analógicos eran de diseño propietario, lo que dificultaba la reposición ante una avería. Los antiguos sistemas de realimentación eran del tipo electromecánico, lo que implicaba elevada complejidad de montaje, calibración y mantenimiento. Debido a la falta de repuestos, obsolescencia de la electrónica, sensores y actuadores hidráulicos, se requirió la modernización del regulador.
La nueva electrónica de control, basada en un PLC digital de última generación facilita tanto la configuración del hardware como la programación de software, permitiendo además la integración con modernos programas de simulación. A su vez las nuevas válvulas de control proporcionales con electrónica integrada facilitan su puesta a punto y mantenimiento por sobre los antiguos sistemas de actuación con realimentaciones mecánicas.
El moderno regulador de turbina cuenta además con nuevas funciones de control y autodiagnóstico, especialmente útiles durante la puesta en servicio y la posterior operación del equipo. El algoritmo básico de control es del tipo PID (Proporcional, Integral, Derivativo) utilizando ganancias que se adaptan a las condiciones de operación del conjunto turbina-dispersora, con la consecuente optimización de la respuesta del regulador.

3 MODELADO DEL SISTEMA A CONTROLAR

Con el fin de poder desarrollar, analizar y ensayar la estrategia de control del nuevo regulador de turbina se adopta una metodología de trabajo basada en el desarrollo de un modelo computacional de la central hidráulica. Dicho modelo se implementa utilizando el software SIMSEN [1].
La fig. 1 muestra el modelo desarrollado utilizando la interfaz gráfica que provee el software mencionado, donde Q_{IN} representa el caudal de entrada a la pileta colectora UQJ.

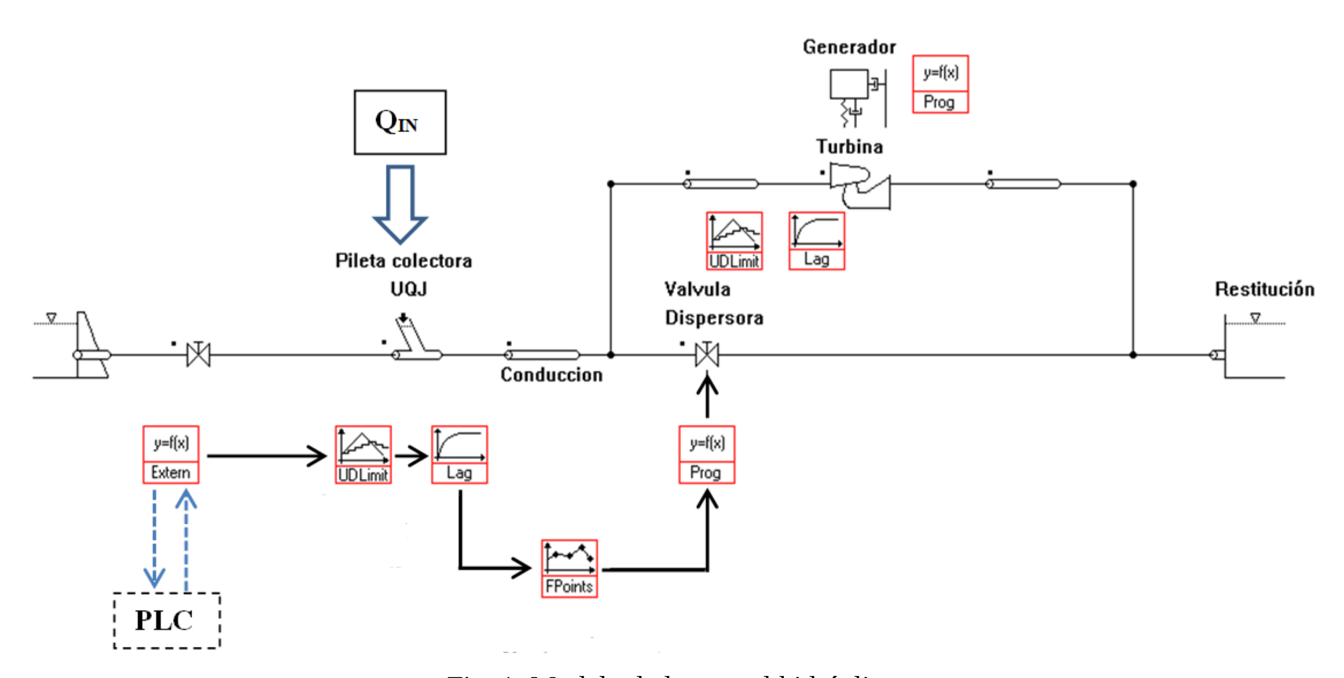


Fig. 1. Modelo de la central hidráulica

3.1 Lazo Hardware-In-The-Loop (HIL)

Como se mencionó en el resumen se recurre a la implementación de un lazo HIL que permita comunicar el software de simulación SIMSEN con el hardware (PLC) que contiene el algoritmo de control de la turbina. Las referencias [2] y [3] brindan una perspectiva de trabajos existentes basados en sistemas HIL aplicados a diferentes áreas técnicas. El concepto del lazo "Hardware-In-the-Loop" se detalla en la fig. 2:

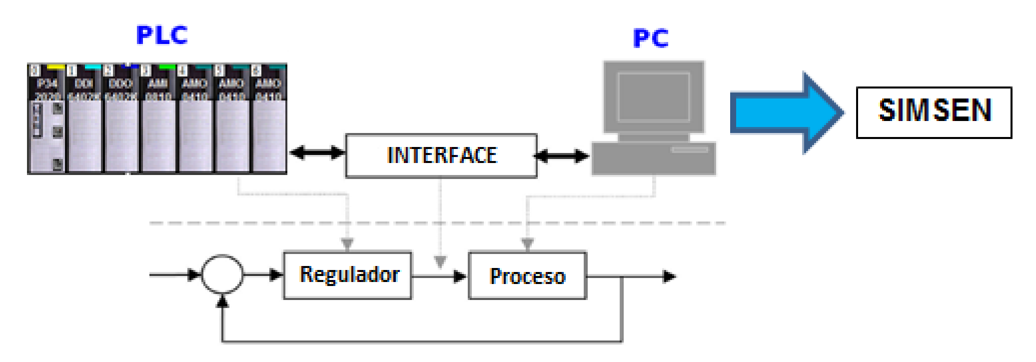


Fig. 2. Diagrama conceptual del lazo Hardware-In-the-Loop (HIL)

3.2 Interface de comunicación

De modo de sea posible lograr una comunicación en tiempo real entre el software de simulación y el hardware de control, se deben cumplir ciertas condiciones:

- El paso de integración (Δt) del proceso simulado debe ser lo suficientemente pequeño para asumir una continuidad en el tiempo. Para simulaciones hidroeléctricas se tiene [4]:

$$\Delta t \leq 2ms \tag{1}$$

- El tiempo de muestreo para intercambio de datos (Ts) entre el hardware y software sea mayor al tiempo que toma el ordenador en realizar una operación de lectura/escritura de información (Ti) sumado al paso de integración Δt. Es decir:

$$Ts \geq \Delta t + Ti \tag{2}$$

La comunicación entre la PC que ejecuta el software de simulación y el hardware PLC se realiza basándose en el uso de una librería dinámica DLL [5], y una interface que adapta los datos al protocolo de comunicación utilizado por el controlador. El esquema se muestra en la fig. 3:

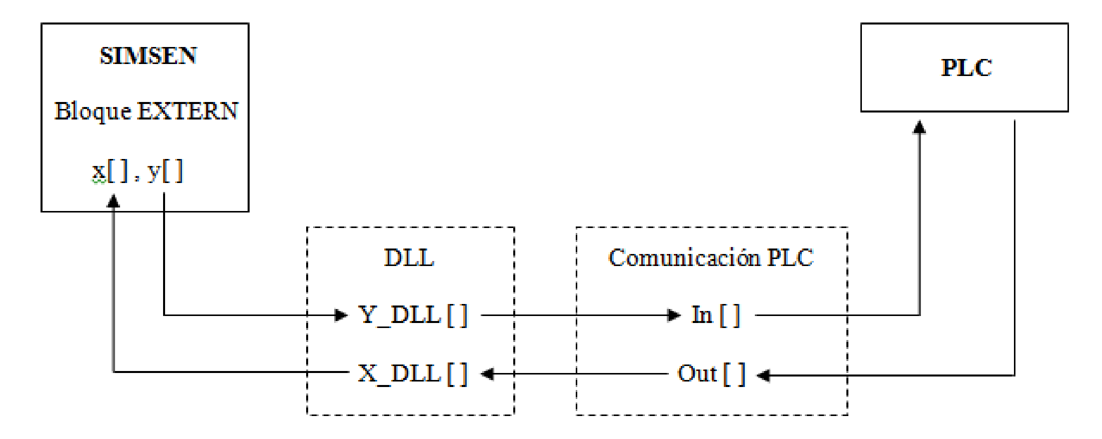


Fig. 3. Esquema de comunicación SIMSEN – PLC

4 SIMULACIONES

Luego de establecer el lazo de comunicación entre el software de simulación SIMSEN (que ejecuta el modelo desarrollado) y el PLC, se realizaron simulaciones de diferentes estados o escenarios de operación del turbo-grupo, desarrollando conjuntamente el algoritmo de control a implementar en el regulador de turbina. Se propone inicialmente un esquema de control donde la válvula dispersora se encarga de realizar el control de nivel de la cámara de carga independientemente del estado de apertura del distribuidor de la turbina. En primer lugar se simula un arranque de la turbina hasta velocidad nominal con una posterior toma de carga. La fig. 4 muestra la evolución temporal de las diferentes variables simuladas en el escenario de operación propuesto.

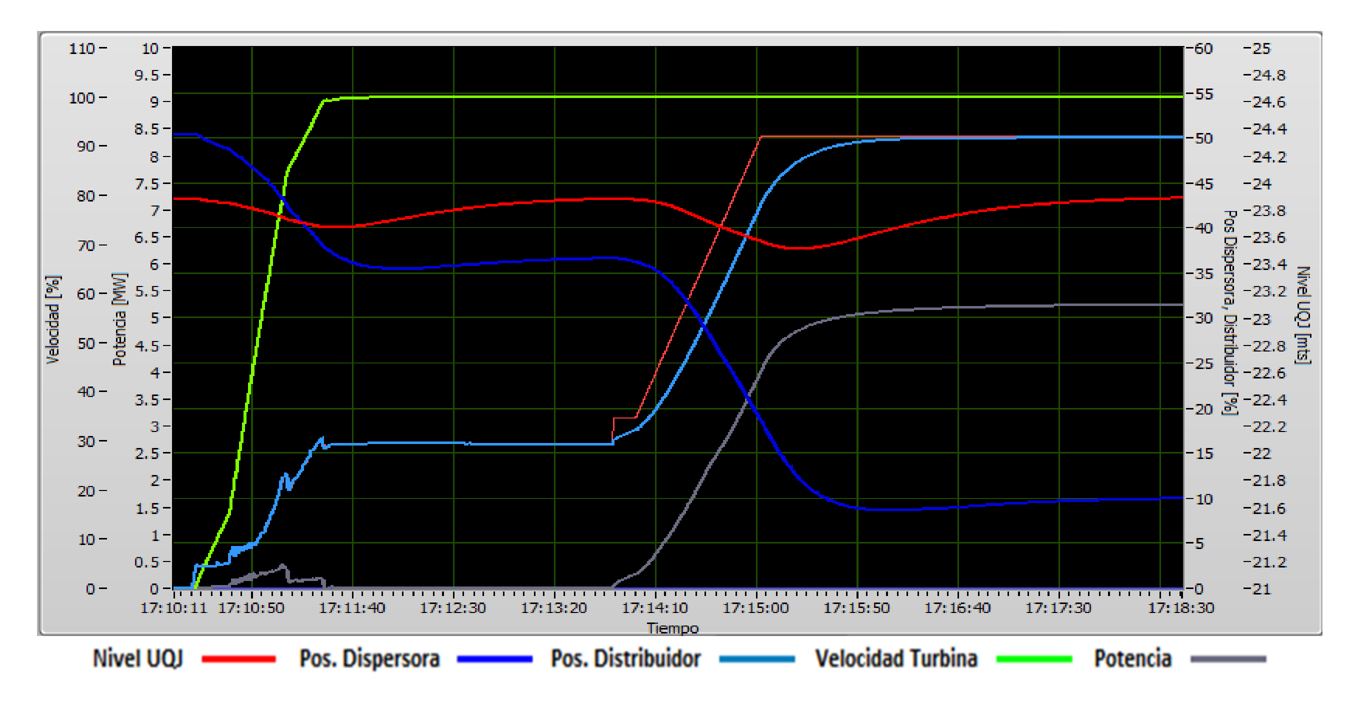


Fig. 4. Simulación arranque de turbina con toma de carga

La evolución temporal del nivel de la pileta (señal "Nivel UQJ") muestra que durante los transitorios producidos por la apertura del distribuidor de la turbina, el nivel de la misma desciende hasta aproximadamente 23.5 m para luego restablecerse en su valor de set-point de 23.9 m debido a la acción de control efectuado por la válvula dispersora. La fig. 5 muestra otro escenario de operación, el cual consiste en un rechazo de carga con cierre del distribuidor de la turbina y apertura de válvula dispersora.

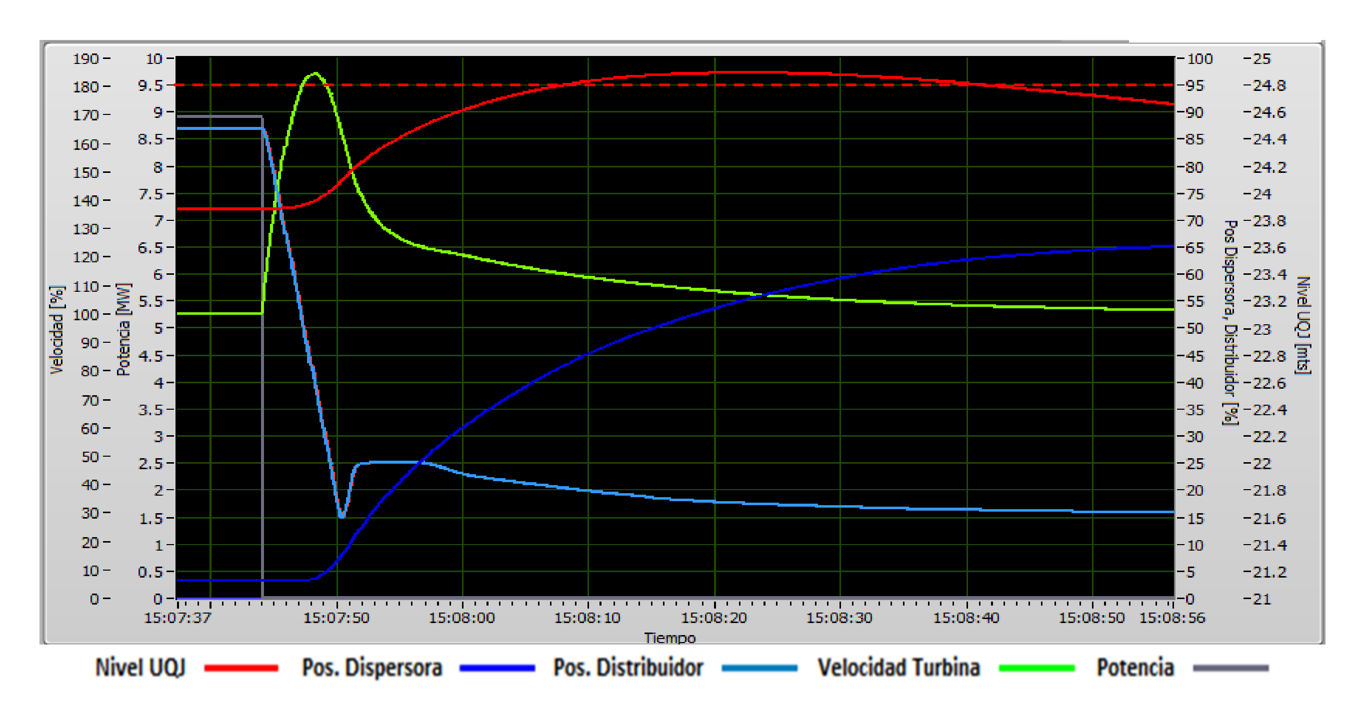


Fig. 5. Simulación rechazo de carga.

Se puede observar que el nivel de la cámara de carga supera los 24.8 m. Dado que el escenario propuesto es una posible condición de operación, este comportamiento es inadmisible funcionalmente.

4.1 Simulaciones utilizando esquema de control feedforward

De modo de disminuir las variaciones de nivel resultantes de los escenarios simulados anteriormente, se plantea un modo de control donde la acción de la válvula dispersora este ligada al comportamiento del distribuidor de la turbina mediante una realimentación feedforward. Esto permite que la válvula dispersora "anticipe" su reacción a los cambios de nivel de la cámara de carga UQJ que pueden ser provocados por acción de la apertura o cierre del distribuidor de la turbina.

El esquema feedforward aplicado al lazo de control de nivel se muestra en la fig. 6:

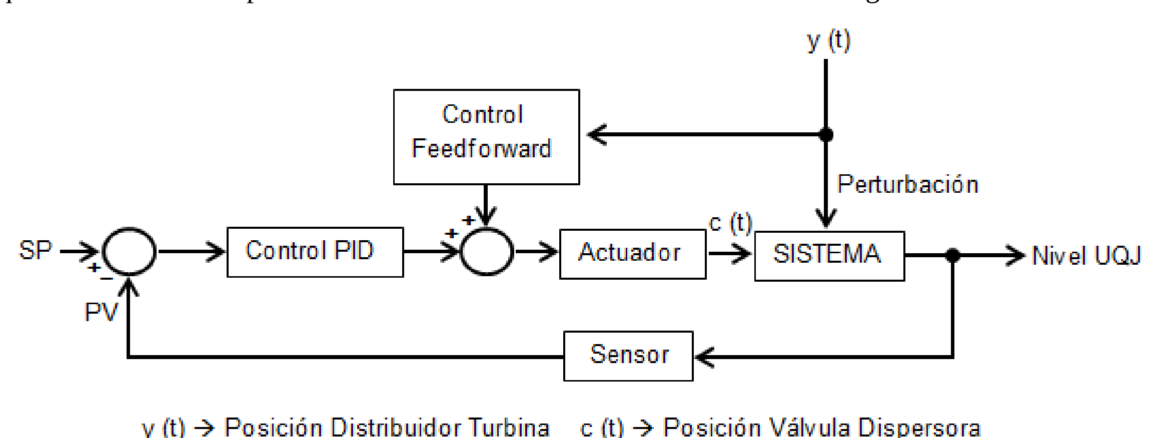
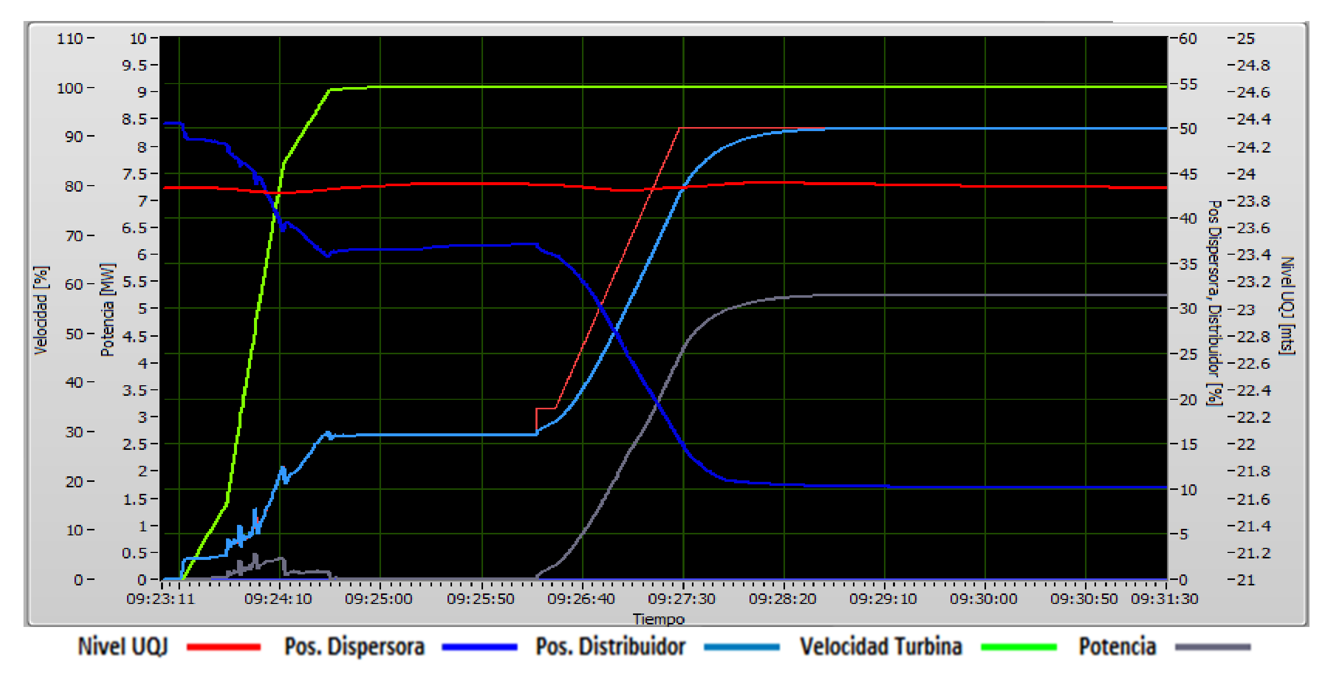


Fig. 6. Esquema feedforward aplicado al lazo de control de nivel

Se plantea nuevamente un arranque de turbina y luego un rechazo de carga, utilizando el esquema de control feedforward aplicado al lazo de regulación de nivel. Las figuras 7 y 8 muestran los resultados obtenidos.



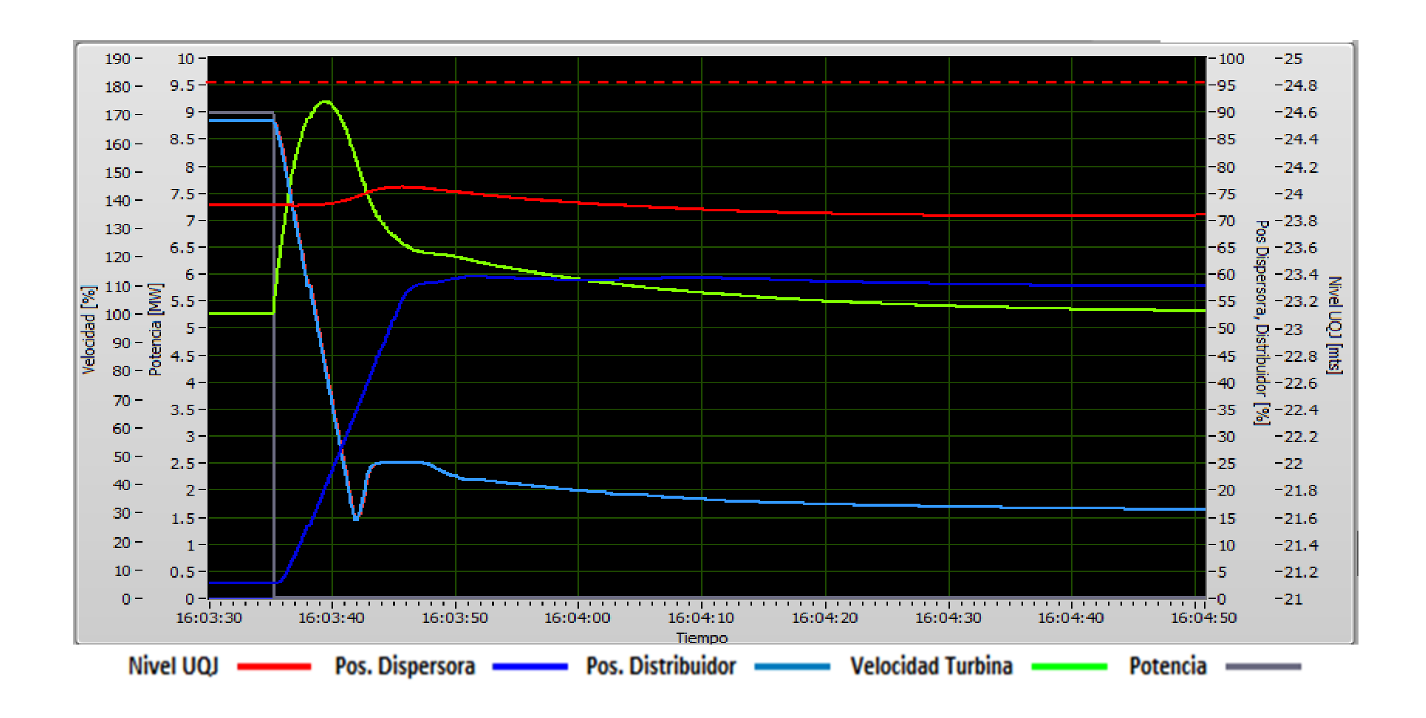


Fig. 8. Simulación rechazo de carga (control feedforward activo)

En la fig. 7 se puede observar que disminuyó considerablemente la variación de nivel de la pileta colectora con respecto a la fig. 4. Luego en la fig. 8 se observa que el nivel de la cámara de carga alcanza un valor máximo de 24.08 m, lo cual no ocasiona ningún riesgo de parada de las bombas de refrigeración de la central nuclear o un eventual rebalse de la pileta colectora. La implementación de un esquema de control con realimentación feedforward mejora considerablemente la regulación del lazo de control de nivel.

5 VALIDACION DEL MODELO

De modo de poder validar el modelo hidráulico conjuntamente con el lazo HIL implementado, se simulan diferentes condiciones de operación. Se comparan luego sus resultados con los obtenidos en sitio durante la puesta en marcha. Las figuras 9,10 y 11 muestran resultados:

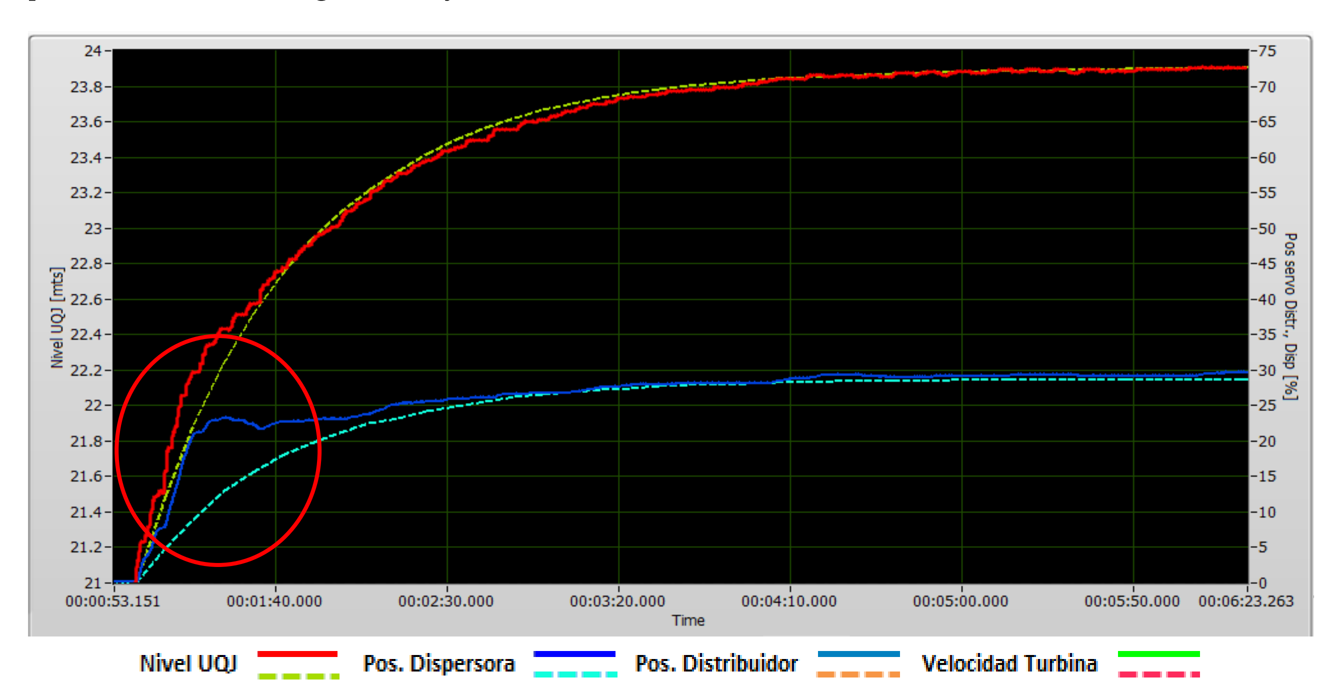


Fig. 9. Llenado de pileta UQJ (control válvula dispersora). Real —— vs. Simulación - - -

La fig. 9 muestra diferencias notorias entre los valores simulados y los medidos en la primera parte del llenado. Estas surgen dado que la pileta se modelo utilizando una chimenea de equilibrio de diámetro constante, siendo que en sitio UQJ posee un área rectangular variable en función del nivel.

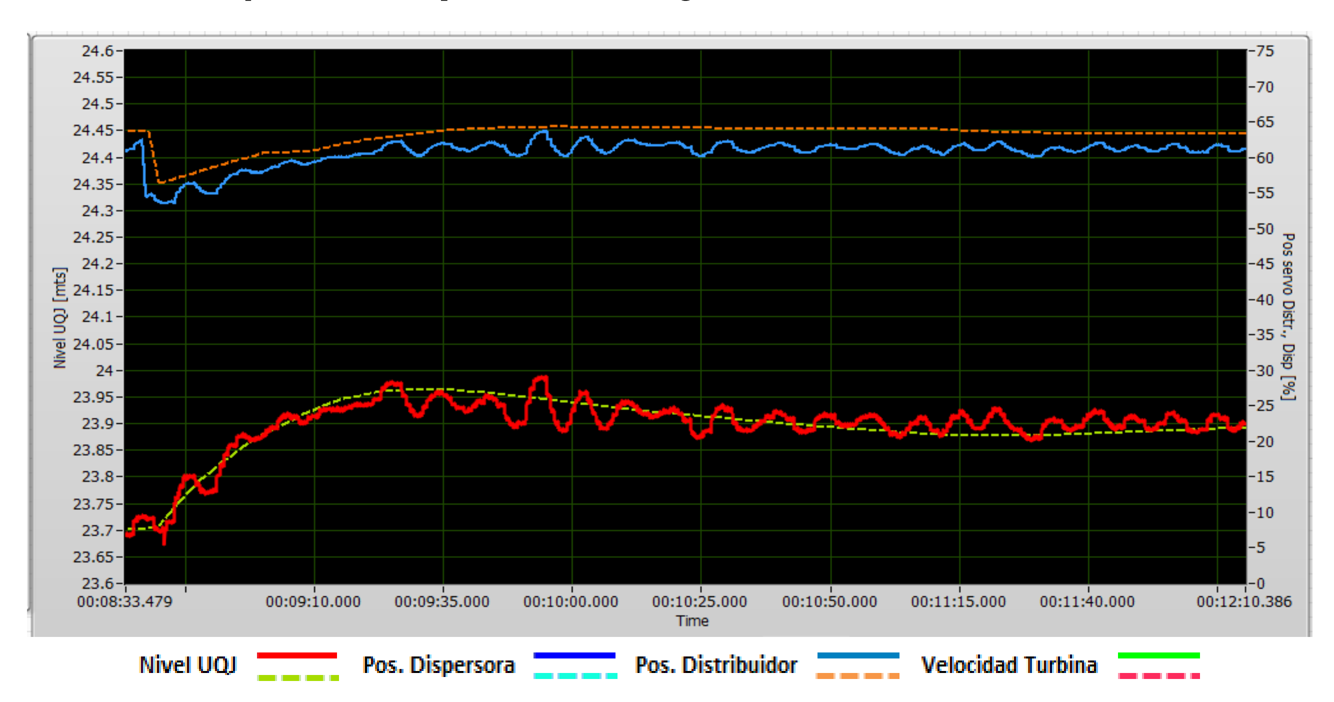


Fig. 10. Escalón de referencia de nivel (control turbina). Real —— vs. Simulación - - -



Fig. 11. Arranque de turbina (válvula dispersora controlando nivel). Real —— vs. Simulación - - -

Los resultados que se presentan en las figuras 9,10 y 11 muestran aceptable concordancia entre los valores simulados utilizando el modelo descripto anteriormente y las magnitudes reales medidas en sitio. Las principales fuentes de discrepancia surgen de diferencias entre las características de la turbina modelo y el prototipo instalado en sitio, modelado de la cámara de carga, además de diferencias entre las características caudal-carrera del modelo y prototipo correspondientes a la válvula dispersora.

6 CONCLUSIONES

El enfoque basado en simulaciones computacionales (que incluyen un modelo de la central hidráulica), utilizadas para el desarrollo y ensayo de la estrategia de control presenta evidentes ventajas:

- La implementación del modelo en conjunto con un lazo HIL permite simular escenarios de operación durante los ensayos en fábrica que en sitio resulta más difícil y riesgoso ensayar.
- El algoritmo de control implementado en el PLC puede ser analizado a fondo durante los ensayos en fábrica. El caso tratado en el presente artículo permitió determinar la necesidad de implementar un esquema de control feedforward.
- Esta metodología también permitió ajustar durante los ensayos en fábrica las ganancias PID de los diferentes lazos de control, los cuales luego fueron corroborados durante los ensayos en sitio.

Tanto el modelo hidráulico implementado en conjunto con el lazo Hardware-In-The-Loop, como los parámetros de los diferentes lazos de control ajustados inicialmente en fábrica fueron validados con los correspondientes ensayos en sitio.

7 REFERENCIAS

[1] C.Nicolet, F. Avellan, P.Allenbach, A.Sapin,J-J.Simond, "New Tools for the Simulation of Transient Phenomena in Francis Turbine Power Plants", Proceedings of the *21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems 2002.*

[2] S.C. Oh, "Evaluation of Motors Characteristics for Hybrid Electric Vehicles Using the Hardware-In-The-Loop Concept", IEEE Transactions on Vehicular Technology.

[3] Z.Jiang, R.A.Dougal, R.Leonard, H.Figueroa, A.Monti, "Hardware-In-The-Loop Testing of Digital Power Controllers", *21st Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2006*.

[4] A.Beguin, P.Allenbach, S.Keller, J-J.Simond, Sven Brausewetter, Jiri Koutnik, "Hardware-in-the-Loop Simulation Software for regulator tests and optimization"

[5] Barry Lichtenstein IBM Poughkeepsie, "Using Dynamic Link Libraries (DLLs) with Language Environment Session 8130/8286".